터널과 지하공간, 한국암반공학회
Vol. 7, 1997, pp. 158~162

TUNNEL & UNDERGROUND Vol. 7, 1997, pp. 158-162
J. of Korean Society for Rock Mech.

〈기술소개〉

지반공학의 모델링 철학

송원경[1)]

1. 서 론

지난 사반세기동안 지반공학(암석역학과 토질역학을 포함한) 분야에서 모델링 기법의 활용은 괄목할 만한 성장을 거듭해 왔다. 과거에는 지반공학 분야의 연구 수단이 실험실과 현장 계측에 초점이 맞춰져 왔으나 이제 그 초점은 계산 쪽으로 옮겨가고 있다. 오늘날 수치 모델링을 하지 않는 사람은 거의 없다고 해도 과언이 아니다. 모델링의 매력은 접근이 용이하고 비용이 적게 든다는 데 있다. 이와 함께 지반공학 문제에 모델링 사용을 촉진시키는 여러 가지 요인들이 발생하였다. 그것은 우선, 강력한 능력을 보유하는 프로그램의 출현과 컴퓨터 하드웨어의 발달을 들 수 있다. 둘째, 구조물 및 건축물 건설의 필요성이 기하 급수적으로 증가하고 있으며, 셋째, 지반공학 이외의 타 분야에서 모델링이 성공적으로 수행되어 왔다는 점을 들 수 있다.

이러한 수치 모델링 사용의 확산은 필연적으로 긍정적인 면과 함께 부정적인 면을 키워 왔다. 문제의 해결을 위해 모델링을 사용하면 현장 계측에 비해 비교가 안될 만큼 시간과 경비를 줄일 수 있는 반면, 계측을 생략한 체 전적으로 모델링에 의존하여 모든 문제를 해결하려 들려는 안이함을 추구하는 경향이 나타나고 있다. 심지어는 모델링 결과가 마치 문제의 진정한 해답인양 포장하여 사실을 왜곡하려는 행태를 보이기까지 한다. 모델링이라는 도구는 문제 해결을 위한 수단이지 문제 해결 그 자체가 될 수 없다는 사실을 알아야할 것이다.

지반공학 분야 연구 업무에 종사하는 사람들 중에 모델링 작업을 하다가 지질, 암석학적인 입력 자료가 부족함을 느끼지 않은 사람은 아마 한사람도 없을 것이다. 자료의 부족을 극복하기 위해서 모델링 작업자는 보통 지반 구조를 극도로 단순화시킨다. 이 때 느끼는 것은 이렇게 단순화된 모델의 결과가 실제와 얼마나 근사할 지 안할 지에 대한 의구심이다.

모델링을 하는 사람이라면 누구나 더 크고 더 훌륭한 모델을 제작하고 싶은 욕망을 갖고 있다. 이때 사람들은 습관적으로 보다 자세한 모델일수록 보다 더 훌륭한 모델이 될 것이라고 믿는다. 이는 필연적으로 더 많은 자료를 요구한다. 그렇지만 이러한 노력은 시간과 자원의 낭비일 뿐만 아니라 나무를 보고 숲을 보지 못하는 우를 범할 수 있다.

그렇다면 문제는 어떻게 하는 것이 올바른 모델링 자세인가 하는 점이다. 이러한 의문을 풀지 못하고 있던 중, 필자는 우연히 수치해석 분야의 거두인 Starfield와 Cundall(1989)이 작성한 "Towards a methodology for rock mechanics modelling"이라는 논문을 접하게 되었는데 여기에서 그 해답을 발견하게 되었다. 이 논문은 지반공학인들이 모델링을 할 때 반드시 알아두어야 할 모델링 기법과 모델링의 진정한 의미 즉 모델링 철학을 다루고 있는데, 이들이 지적하고 있는 사항은 수치모델링을 이용하여 지반공학 문제를 다루는 사람들이 반드시 염두에 두고 따라야 할 훌륭한 지침이 될 수 있으리라 여겨져 그 내용을 정리하여 본 지에 싣는다.

2. 지반공학 문제의 차별성

토양이나 암반은 매우 다양한 역학적 요소들의 집합체이다. 이러한 지질학적 복잡성은 모델링을 지반공학 문제에 적용시키는데 있어서 커다란 장애물로 작용한다. 이를 극복하기 위해서는 대상 지반의 구조를 단순화시켜야 한다. 우리가 모델을 제작하는 것은 실제의 세계가 이해하기 힘들 정도로 너무 복잡하기 때문이다. 그런데 만일 우리가 만든 모델 역시 복잡하다면 지반 거동을 이해하는데 전혀 도움이 안될 것이다. 결국 모델링 기술은 모델의 어느 면이 지질학적으로 핵심이 되는지를 결정하는 데 있다. 그 다음에 그 기술을 어떻게 실현시키느냐 하는 방법론을 찾아야 한다.

타 공학 분야에서의 모델링 기술의 발달이 지반공학 분야에서의 모델링 작업자들에게 큰 원동력이 된 것은 사실이나 그 기술을 전적으로 모방하는 것은 큰 오류를

1) 정회원, 한국자원연구소, 자원개발부, 선임연구원

불러일으킬 수 있음에 주의해야 한다. 왜냐하면 지반공학은 항공공학, 심지어는 구조역학과도 유사성보다는 차이점이 더욱 클 수도 있기 때문이다. 모델에서 얻을 수 있는 결과뿐만 아니라 모델링 기술과 그 접근 방법이 한 쪽에서는 적절하다 할 지라도 다른 쪽에서는 적절하지 않을 수 있다. 지반공학 분야에서 모델링을 수행하는 사람들은 이러한 차이점을 인식하여 유효 적절하고도 차별적인 모델링 기법을 개발하여야 한다.

3. 자료가 한정된 문제

Holling(1978)은 문제의 이해도와 자료량에 따라 모델링 문제를 그림 1과 같이 구분하였다. 종축은 입수가 가능한 자료의 질과 양을 나타내는 척도이고 횡축은 문제의 이해도를 나타내는 척도이다. 제 1 구역의 경우 자료는 충분하나 이해도가 떨어진다. 이곳에서는 통계가 적절한 모델링 도구가 될 수 있다. 제 3 구역에서는 자료와 이해도가 모두 우수하다. 따라서 확신을 갖고 모델링을 수행할 수 있으며 타당성의 검증이 용이하다. 제 2 구역과 제 4 구역은 관련 자료의 획득이 불가능하거나 용이치 않은 문제에 해당된다.

우리는 애매모호함이 전혀 없는 완벽한 모델을 제작하기에 충분할 정도로 지반을 알고 있지 못하므로 지반공학은 항상 자료가 한정된 구역에 속하지 않을 수 없다. 반면 다른 대부분의 공학 분야는 제 3 구역에 속한다.

지반공학을 모델링 하는 작업에 반대하는 예전 논리 중 일부는 기본적으로 제 3 구역에서의 모델링의 기본 원리가 제 2 구역이나 제 4 구역과 같이 자료에 한계가 있고 보다 무정형적인 문제에 반드시 맞는다고 할 수 없다는 것이었다. 한편, 현대의 경향은 충분한 자료를 수집하여 지반공학을 제 3 구역으로 옮겨놓음으로써 전통 방식대로 모델을 이용할 수 있기를 바라는 것이다.

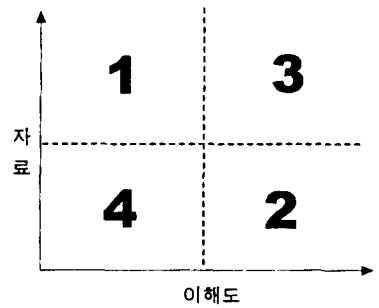

그림 1. 모델링 문제의 구분(Holling, 1978).

예전 논리도 현대의 목표도 옳지 못하다. 전통 방식의 모델링이 지반공학에는 부적절하다고 한다면 보다 더 많은 사고와 비전통적인 모델링의 필요성만을 제기하므로 예전 논리는 쉽게 폐기되어야 한다. 현대의 경향은 더욱 비관적이다. 왜냐하면, 제 2 또는 제 4 구역에서 제 3 구역으로 이동하려면, 모델의 이해나 설계에 현저한 향상이 없는 상태에서 더욱더 복잡한 모델의 개발과 현장 조사비의 증가가 필연적이기 때문이다. 이에 반대되는 논리가 설득력이 있다. 첫째, 지반을 전통 방식대로 모델링하기에 충분한 자료를 획득할 수 있으리라 기대하는 것은 절대 부질없는 생각이다. 둘째, 모델이 더욱더 상세해지면 모델을 지능적으로 조정할 수 없게 되고 따라서 그것은 효과적이기는커녕 비효과적인 도구로 전락한다.

현대나 예전의 논리에 얽매이기보다는 오히려 제 3 구역처럼 정립이 잘된 문제를 위해 개발된 모델링 도구를 어떻게 하면 제 2 구역과 제 4 구역에 속한 지반공학 문제에 잘 적용시킬 수 있을 지에 관심을 갖는 편이 낫다. 이를 위해서는 지반공학이 전통적인 주형에는 맞지 않음을 인식하고, 지반공학을 기존 모델링 철학에 맞추려 하지 말고 지반공학에 맞는 모델링 철학을 개발할 필요가 있다.

4. 지반공학의 모델링 철학

Starfield와 Bleloch(1986)는 자연환경을 모델링 하는 방법을 설명하면서 제 3 구역에 해당하는 문제들과 제 2 및 제 4 구역에 해당하는 문제들과의 차이점을 다음과 설명하였다.

- 기본적인 문제는 해상도의 차이이다. 제 3 구역에서는 한 문제를 해결함에 있어서 어느 정도의 상세한 내용이 필요하며, 단순화시키는 가정들이 어떤 경우에 적절한가를 알고 있다. 반면에 제 2 구역과 제 4 구역에서는 문제를 극히 단순화시키는 것에 겁을 집어먹는다. 그 결과 모델링 작업자는 지엽적인 것에 집착하게 되어 모델을 쓸데없이 복잡하게 제작하는 경향이 나타난다.
- 제 2 구역과 제 4 구역에서는 종종 문제 제기의 잘못으로 인하여 결과 해석시 어려움이 초래되고, 따

라서 문제가 올바르게 모델링 되었는지 안되었는지에 대하여 의구심을 갖게 된다.

- 제 3 구역에서 모델의 타당성을 검증하는 과정은 잘 알려져 있다. 제 2 구역과 제 4 구역에서는 그것이 불가능할 수도 있다. 그러나 모델링 작업자는 이러한 불가능성을 인정하고 실용주의적 접근법을 개발하려 하지는 않고 미사여구를 동원하여 타당성 검증과정을 얼버무리는 경향이 있다.
- 제 3 구역의 모델들은 일단 타당성이 검증되기만 하면 그 모델은 결과 예측에 거의 반복적으로 사용할 수 있다. 제 2 및 제 4 구역의 모델들은 결코 반복 사용이 불가능하다. 이들을 사용할 때는 훨씬 더 많은 주의와 숙고가 필요하다.

지반공학 모델링을 해봤던 사람이라면 누구나 위에 열거한 사항들이 지반공학 문제에 영구히 존속한다는 사실을 알고 있을 것이다. 그러므로 자료 획득에 한계가 있는 제 2 및 제 4 구역에 속해 있는 문제들을 모델링할 때 그 접근 방법은 제 3 구역 문제들과는 차별되어야 한다. 제 2 및 제 4 구역에 속하는 지반공학 문제가 제 3 구역과 차별적인 모델링 철학은 다음과 같다.

- 모델은 사실의 모방이 아니라 사실의 단순화 작업이다. 모델은 특수한 임무를 위해 설계되거나 선택되어야 할 지적 도구이다.
- 모델의 설계는, 작업이 진행되고 있는 시스템의 세부사항보다는 모델로부터 답을 얻고자 하는 의문점들에 따라 진행되어야 한다. 이러한 자세를 갖추고 있어야 모델을 단순화시키고 조정하는데 도움이 된다.
- 심지어 단 한 개의 복잡한 모델을 제작하느니 서너 개의 아주 단순한 모델을 제작하는 것이 적절할 수도 있다. 단순 모델들은 문제의 서로 다른 면들과 연관이 되거나 다른 시각들로부터 같은 의문점들을 지향할 것이다.
- 모델의 타당성을 검증하기 위해 애쓰지 말고 모델에 대한 자신감을 얻고 그것을 사용하면서 변형시켜 나가는데 목표를 두어야 한다.
- 자료가 한정된 문제를 모델링하는 목적은 절대적인 값을 예상하는데 있는 것이 아니라 이해도를 높이고 잠정적인 대용품을 구하는데 있다.
- 우리들은 제방을 쌓듯 천천히 그리고 고통을 감내하면서 제 4 구역으로부터 제 3 구역으로 이동해야 한다. 우선 하나의 단순한 모델을 제작하고 추측하면서 이를 실행시켜 본다. 그 결과들은 거의 언제나 자료를 얻는 새로운 방식 또는 이용 가능한 자료를 해석하는 새로운 방식을 제시해 준다. 이러한 점들을 개선해 나가면서 새로 필요한 자료나 통찰력 등을 얻게 된다. 이 전 과정을 '순응형 모델링법'이라고 칭할 수 있다.

5. 모델링 지침

앞서 논의한 모델링 철학을 이해하였다면 지반공학 문제에 적절한 모델링 지침을 마련할 수 있을 것이다.

(1) 모델링을 시작하기 전에 나는 왜 이 모델을 제작하고 있는지, 그리고 답을 얻고자하는 의문점들이 무엇인지를 확인한다.

(2) 프로젝트 작업 단계중 가장 이른 단계에 한 개의 모델을 제작하여 어떤 자료와 이해도가 필요한지 파악한다. 현장 자료를 기다리느라 작업을 지체하지 말아야 한다. 가능한 한 빨리 현장에 대한 개념적 모델을 갖춘다. 훌륭한 개념적 모델을 갖고 있으면 현장 실험을 더 훌륭하게 설계할 수 있으므로 시간과 경비를 절약할 수 있다.

(3) 문제가 갖고 있는 역학을 직시한다. 중요한 메카니즘과 변형 모드 그리고 가능하다면 파괴 형태를 확인하려고 노력한다.

(4) 모델상에서 수행하고자 하는 실험들에 대하여 생각해 보고 정답들이 어떠할 지를 정량적으로 그려보도록 노력한다. 특히 현장에서 진행되고 있는 작업에 대해 두 가지 이상의 아이디어를 갖고 있으면 단순한 수치 실험을 제안하여 그중 한 개 이상의 아이디어를 제거한다(즉 모델을 이용하여 가정의 잘잘못을 입증하거나 일치하지 않는 자료를 배제시킨다).

(5) 중요한 메카니즘이 일어나게 하고 또한 염두에 두고 있는 실험들을 수행시킬 수 있는 가장 단순한 모델을 설계하거나 빌어온다.

(6) 모델을 완성하고 가장 단순한 실험을 선택해서 계산을 수행한다. 모델이 기대치와 잘 부합된다면 더 복잡한 실험들을 진행한다. 만일 그렇지 않다면 생각(또는 모델)의 취약점들을 찾아내어 이를 보완한다. 다른 실험들에도 비슷한 접근법을 취한다. 즉, 가능성들을 찾아내어 비판하라!

(7) 이용 가능한 모델은 하나 뿐인데 그 모델이 보완할 수 없는 약점들을 갖고 있다면(예를 들어, 3차원 문제가 분명한 상황에서 2차원 모델밖에 이용할 수 없을

경우), 일련의 시뮬레이션을 실시해서 실제 경우를 부분적으로 다루어 본다. 실제와 유사한 시뮬레이션을 실시할 수 없더라도 많은 경우 그 경계는 충분히 밀접해서 쓸모 있는 통찰력을 얻게 될 것이다.

(8) 일단 단순한 모델(들)로부터 얻을 수 있는 모든 것을 배웠다면 보다 복잡한 모델들을 실행시켜서 단순 모델에서 무시된 부분중 모델의 거동에 영향을 크게 미칠 수 있는 면들을 탐구해 보고 싶을 것이다. 또한 보다 복잡한 모델을 이용하여 한 개나 두 개의 설계를 해보고도 싶을 것이다. 그러나 이것은 종종 의문점을 밝히기보다는 결과를 아름답게 꾸미는 역할을 하게 될 뿐인 경우가 많다. 설계용이라면 흔히 모델로부터 드러난 메카니즘에 기초를 두고 단순한 계산식들을 개발하는 것이 좋다. 그런 다음 이 식들을 수치 모델용보다는 설계용으로 이용한다.

4에서 6단계까지는 순응 과정에 있어서 핵심적인 단계이다. 이 단계는 다른 여러 가지 방법으로도 수행 가능하다. 예를 들어, 사용자는 그저 한 개의 모델보다는 단순한 일련의 대용 모델을 시험해 보기를 원할 지도 모른다. 모델(들)을 수행시킬 때 추측해서 입력해야할 변수들 값의 범위를 정해야 한다. 변수값들이 타당성을 갖는 범위 내에서 모델을 수행시켜야 한다. 모델의 결과가 변수값들에 대해서 비교적 민감하지 않은 범위 내에서는 안전하나 민감한 범위 내에서는 민감도의 형태로부터 변수값들이나 수행해야 할 현장실험의 한계를 제시해 주어야 한다.

사람들은 보통 "컴퓨터로부터는 컴퓨터에 넣은 것만을 얻어낸다" 또는 "해석 결과는 입력자료만큼만 정확할 뿐이다"라고 말한다. 일면 이 말들은 옳다. 하지만 다른 면에서는 그릇된 말이다. 주의 깊게 생각해서 모델링 작업을 수행하면 새로운 지식이나 또는 적어도 신선한 이해를 얻을 수 있다. 모델링 프로그램의 저자조차 자신의 프로그램을 돌리면서 새로운 사실들을 배운다.

위에서 언급한 지침의 핵심 철학은 지반공학 분야 모델들을 마치 훌륭한 실험실 작업을 하는 것과 같은 조심성과 호기심을 갖고 이용해야 한다는 것이다. 이제 한 가지 실례를 통해서 지반공학 모델링의 접근법을 익혀보자.

6. 암반사면의 모순

한 퇴적암에 사면이 건설될 예정이었다. 층리면(bedding plane)이 매우 급하기 때문에 설계자는 사면각이 층리면과 일치하도록 설계하였다(그림 2참조). 잠재 파괴면이 사면에 부각되고 있지 않았으므로 이런 식으로 하면 파괴를 피할 수 있을 것으로 기대되었다. 그러나 사면이 완성되었을 때 전면(face)은 연속적으로 파괴되었으며 사면으로부터 미끄러져 내려오는 암편들을 발견하게 되었다. 정밀 검사를 통해서 파단면이 수평으로 형성되고 있다는 사실이 인지되긴 했으나 이것이 사면의 불안정성과 어떤 연관성을 갖고 있는 지는 즉각적으로 판명되지 않았다. 왜냐하면 암반은 통상 수평 방향으로는 움직이지 않기 때문이다.

개별요소 프로그램인 UDEC을 이용하여 층리면과 파단면에 여러 개의 마찰값들을 적용하여 전산 시뮬레이션을 실시하였다. 실제로 수평면들이 파괴의 주범인 것을 알게 되었다. 왜냐하면 이것들이 암석편의 회전을 유발시키기 때문이다(그림 3참조). 여러 가지 다른 물

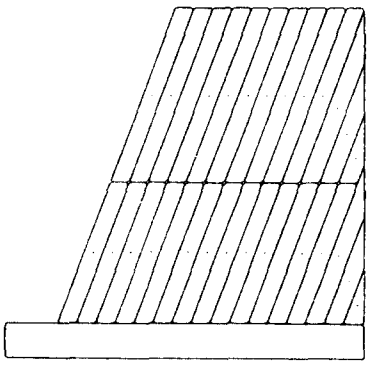

그림 2. 암반사면의 초기지형. 사면은 층리면과 평행하며 두 개의 수평 단층이 존재함.

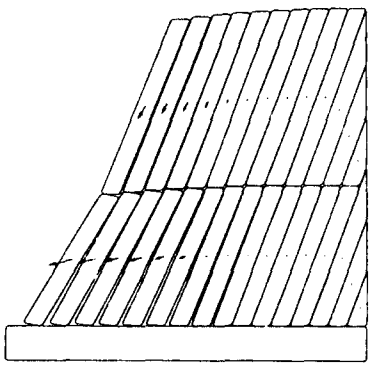

그림 3. 일정 시간이 지난 후의 암반 지형. 계산은 UDEC 프로그램에 의해 수행되었으며 마찰계수로는 0.15를 사용. 수평단층으로 인해 암석의 회전이 발생함.

성을 갖고 계산을 수행하면 경험적으로 파괴가 일어날 수 있는 조건을 정의하고 보강대책을 설계할 수 있다.

아마도 더욱 중요한 것은 일단 컴퓨터 모델이 파괴 메카니즘을 제시(또는 확인)하였다면 힘의 평형 원리에 의하여 간단한 식을 개발할 수 있다는 점일 것이다. 예를 들어 하나의 박판에 대해 한계평형에서 마찰각과 사면각을 연관시키는 식을 유도할 수 있다.

파괴 메카니즘이 확인된 후에는 그것이 당연해 보이나, 막상 현장에서는 아무런 연관성이 없는 요소들에 의해 압도되기 때문에 여러 사실들이 그다지 명쾌하지 않는 경우가 종종 있다.

이 예를 통해서 우리는 원칙적으로 미심쩍은 메카니즘을 재생산할 수 있는 능력이 있는 모델을 선택하는 것이 얼마나 중요한 지를 알 수 있다. 여기에 사용한 모델 대신 층리면 효과를 표현하는 이방성 재료(transversely isotropic materials)를 사용할 수도 있었다. 그러나 이렇게 했다면 회전을 포함하는 모드에서 파괴가 일어날 수 없었을 것이다.

모델링 과정이 완결되고 새로이 이해를 하게 되면, 드러난 메카니즘은 너무도 당연하기 때문에 모델링이 반드시 필요했는지에 의문을 제기하는 사람들이 가끔 있다. 퀴즈 해답을 알고 나면 그 질문이 너무도 쉬웠다는 것을 깨닫는다. 탐정소설을 읽는 사람들은 "나는 줄곧 누가 그 짓을 했는지 알고 있었다"는 식으로 말한다. 단지 그 책을 다 읽고 난 후에 말이다!

7. 결 론

오늘날 컴퓨터는 그 성능과 기능의 발달로 산업 전 분야에 걸쳐 실험실 실험을 대체하는 수단으로 적극 이용되고 있다. 컴퓨터 화면 속에서 자동차를 만들고 집을 짓는다. 그리고 이렇게 만든 자동차를 다시 화면 속에서 벽에 충돌시켜 보기도 하고 집이 마음에 들지 안으면 순식간에 부시고 다시 짓기도 한다. 결국 컴퓨터는 제품 구상 단계에서 제품을 일일이 제작해 보지 않고서도 그 물건의 모양과 성능 그리고 결함 등을 미리 볼 수 있게 해 주는 훌륭한 도구이다.

그렇지만 단순히 모델링 과정만을 거쳐 만든 자동차나 집이 완전한 제품이 되는 것은 아니다. 그것은 모델이 우리가 알고 있는 역학적인 관계식 내에서밖에는 움직이지 않는데 실제로는 우리가 모르고 있는 더 많은 변수들이 사물을 움직이는데 간여하기 때문이다. 따라서 화면 속에서 만들어진 가상의 제품이 완전한 실체가 되기 위해서는 실물을 제작하여 실제 자연 환경 속에서 실증 실험을 거치지 않으면 안된다.

지반공학 분야에서는 이러한 미지의 요소들이 타 분야에서보다 훨씬 많이 존재한다. 토양이나 암석으로 표현되는 모델의 각 요소는 우리가 미리 정해 놓은 구성방정식이라는 틀 속에서 움직인다. 더욱이 문제를 풀 때 이 식들이 요구하는 여러 변수값들을 충분히 확보하지 못할 경우가 대부분이다. 따라서 이러한 상황에서 모델링을 통하여 얻은 결과를 절대적인 것으로 평가해서는 안된다. 컴퓨터가 보여주는 모델의 거동은 실제 환경에서의 거동과 차이가 있을 수 있기 때문이다.

그렇다고 모델링의 가치를 평가절하해서는 곤란하다. 모델은 적은 노력과 시간 그리고 경비를 들이면서 지반의 역학적 거동을 모의 실험할 수 있는 유용한 도구이기 때문이다.

실험실에서 지질 재료를 실험할 때 사전에 충분한 준비를 거치고 다수의 실험을 하며 실험 도중 발견되는 오류를 그때그때 시정하여 최적의 결과를 얻듯이 지반공학 모델링도 이러한 과정을 거치는 것이 바람직하다. 즉, 풀고자 하는 의문점들을 정확히 파악하고 가장 단순한 모델을 제작하여 문제의 이해도를 높이며, 모델링 중에 나타나는 결함을 보완하여 가능한 한 실제에 가까운 모델을 제작하려고 노력해야 한다. 이런 의미에서 모델링은 지적인 실험이라고 말할 수 있다. 특히 지반공학과 같이 획득할 수 있는 자료의 수가 한정될 수밖에 없는 경우에는 더욱 그러하다. 본 글은 지반공학 문제를 다룰 때 갖추어야할 모델링 철학과 모델링 작업을 훌륭하게 완수하기 위한 기법에 관하여 기술하였는데 이 글이 모델링을 하는 사람들에게 작으나마 참고가 되기를 바란다.

참 고 문 헌

1. Starfield, A. M. and Cundall, P. A.., 1988, *Towards a methodology for rock mechanics modelling*, Int. J. Rock Mech. and Mining Sci., Vol. 25, No. 3, pp. 99-106.
2. Holling, C. S. (Editor), 1978, *Adaptive environmental assessment and management*, Wiley, Chichester.
3. Starfield, A. M. and Bleloch, A. L., 1986, *Building models for conservation and wildlife management*, Macmillan, New York.